

# Séquestration du carbone et usage durable des savanes ouest-africaines : synergie ou antagonisme ?

Raphaël J. MANLAY, Grégoire T. FRESCHET,

Luc ABBADIE, Bruno BARBIER,

Jean-Luc CHOTTE, Christian FELLER,

Maya LEROY, Georges SERPANTIÉ

## Introduction

Les écosystèmes de savane ouest-africaine couvrent de vastes superficies ( $5.10^6 \text{ km}^2$ ), en grande majorité exploitées par l'agriculture et le pastoralisme (MAYAUX *et al.*, 2004). Ils associent des systèmes herbacés et arborés, les faciès de végétation étant fortement pilotés par la pluviosité annuelle selon un gradient latitudinal. Dans ces écosystèmes, pour des raisons principalement démographiques et techniques – et, demain, sans doute climatiques – les ressources carbonées se raréfient, fragilisant les exploitations agricoles, et allant *a contrario* des mesures actuelles nécessaires de limitation des émissions de carbone dans l'atmosphère.

Dans ce contexte, deux points de vue sur le cycle du carbone de ces espaces coexistent, largement relayés, voire façonnés, principalement par des communautés scientifiques et institutions du Nord. D'une part, pour les agriculteurs, le carbone est à la fois un bien économique (production agricole) et un moyen de production (matière organique du sol, fourrage, construction, chauffage). D'autre part, pour l'humanité, le carbone, constitutif de gaz à effet de serre (GES) dont la contribution au changement climatique est majeure (IPCC, 2013), est un élément à relocaliser de l'atmosphère vers notamment les sols et les plantes, afin d'atténuer le changement climatique.

Beaucoup de discours politiques et scientifiques considèrent que les deux points de vue, agro-écologique local et environnemental planétaire, ont des objectifs

communs, voire synergiques, vis-à-vis du cycle du carbone. Un concept récent (LIPPER *et al.*, 2014) – l’agriculture climato-intelligente – propose une synthèse entre ces deux points de vue, qui vise à « durablement augmenter la productivité, la résilience (adaptation) et réduire les émissions ou fixer les GES, et améliorer la sécurité alimentaire nationale et contribuer à la réalisation des objectifs de développement du pays » (FAO, 2010). Cependant, ce concept est controversé, et de nombreuses organisations non gouvernementales le rejettent en raison (1) de certaines postures idéologiques implicites (une obligation de résultats de réduction des GES, et non de moyens, qui met par exemple sur le même pied d’égalité l’agriculture industrielle et l’agriculture familiale), (2) du manque d’un système d’évaluation et de suivi des résultats, et (3) de l’institutionnalisation de sa mise en œuvre déséquilibrant les rapports de force entre firmes multinationales et représentants de la société civile (AUBERT *et al.*, 2015 ; CARON et TREYER, 2015).

Plus généralement, les savanes ouest-africaines pourraient jouer un rôle important en termes d’atténuation du changement climatique en raison de leurs très vastes superficies, mais les contextes climatique et démographique invitent à une certaine prudence. Pour des raisons politiques notamment, la mise en œuvre d’actions d’atténuation du changement climatique reste faible en Afrique de l’Ouest (moins de 1 % des projets du monde liés à l’usage des terres dans le Mécanisme pour un développement propre, selon FENHANN et SCHLETZ, 2015). De même, des verrous biophysiques et sociaux limitent le potentiel de séquestration de carbone des savanes de cette région et sont susceptibles d’engendrer des conflits avec le service de fourniture premier assigné à l’agriculture. Par ailleurs, le changement climatique, inévitable au regard des trajectoires mondiales actuelles d’émission de GES (IPCC, 2013), impactera de façon hétérogène la productivité agricole dans la région (SULTAN *et al.*, 2014) et le cycle du carbone, et rend incertaines les prévisions de l’évolution de ces derniers.

Ce chapitre<sup>1</sup> prend en compte l’ensemble de ces difficultés pour proposer une vision critique et alternative du lien entre l’usage des terres et la lutte contre le changement climatique.

## Atténuer le changement climatique et viabiliser l’agriculture dans les standards existants

Trois compartiments majeurs (biomasses arborée et herbacée, sols) stockent le carbone dans les savanes ouest-africaines. Dans ce chapitre, la séquestration du

<sup>1</sup> Ce chapitre s’inspire de communications orales faites sur séquestration du carbone et agriculture durable en Afrique de l’Ouest au Congrès mondial de sciences du sol en 2006, et devant le Groupe des acteurs de l’ingénierie écologique (GAIE) en 2015.

carbone est comprise *sensu* BERNOUX *et al.* (2006), soit l'écart net entre le stockage du carbone lié à un scénario de référence et celui lié à une activité donnée, modulés des émissions de GES dues à la réalisation de l'activité, la mise en commun du bilan de chaque GES étant faite par l'utilisation de potentiels de réchauffement global sur une durée de 100 ans (IPCC, 2013).

Ce chapitre examine d'abord trois schémas d'intensification fréquemment promus : l'augmentation de la fertilisation organominérale des cultures, l'agriculture de conservation, et l'agroforesterie.

### **Augmentation de la fertilisation organominérale des cultures**

L'objectif de cette pratique est de reconstituer ou augmenter le stock de nutriments du sol afin de favoriser la productivité végétale, éventuellement en renforçant le stock de carbone du sol.

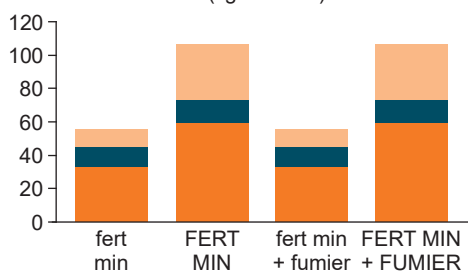
L'essai à long terme de Saria, au Burkina Faso offre des résultats saisissants. Quatre modalités de fertilisation du sol (fertilisation minérale ou organominérale du sol selon deux niveaux d'apports) y ont été testées pendant 40 ans (fig. 1a). La fertilisation uniquement minérale engendre une émission nette de carbone vers l'atmosphère en raison d'une baisse du stock de carbone du sol, à laquelle s'ajoutent les émissions engendrées par la synthèse, le transport et l'application du fertilisant. En revanche, le bilan environnemental de la fertilisation organominérale dépend de l'intégration (ou non) de l'élevage dans le périmètre de l'activité d'atténuation, car les émissions de GES animales (surtout méthane – CH<sub>4</sub> et oxyde nitreux – N<sub>2</sub>O, le bilan en CO<sub>2</sub> étant presque nul étant donnée l'origine du fourrage consommé) excèdent largement la fixation du carbone dans le sol induite par la fertilisation (fig. 1b).

Comme d'autres pratiques, la fertilisation organominérale se heurte au fait que les sols des savanes ouest-africaines, faiblement argileux, soumis à un climat tropical et sièges d'une forte activité biologique, ont une faible capacité de stockage du carbone, quelles que soient les pratiques culturales (PIERI, 1992). La fertilisation organominérale permet certes d'accroître les rendements (tabl. 1, fig. 1c), mais elle mobilise des ressources végétales (fourrage, voire litière animale) pour l'élevage, créant une compétition avec d'autres usages (agronomique, de construction, voire énergétique). En ce sens, elle augmente les risques de privatisation d'une ressource partiellement mutualisée par la vaine pâture, ce qui est susceptible de modifier les rapports de force entre petites et grosses exploitations (ANDRIEU *et al.*, 2015 ; MANLAY *et al.*, 2004).

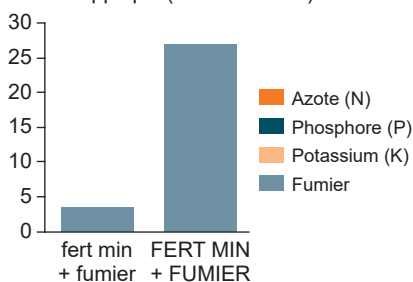
En termes d'évaluation du potentiel de la fertilisation sur le stockage du carbone par les sols, la forte hétérogénéité spatiale (naturelle, mais aussi entretenue en tant que moyen de s'affranchir du risque de variabilité climatique) des sols et leur faible capacité de stockage imposent un grand nombre de mesures, et donc un coût élevé de suivi.

### a. Caractéristiques de l'essai

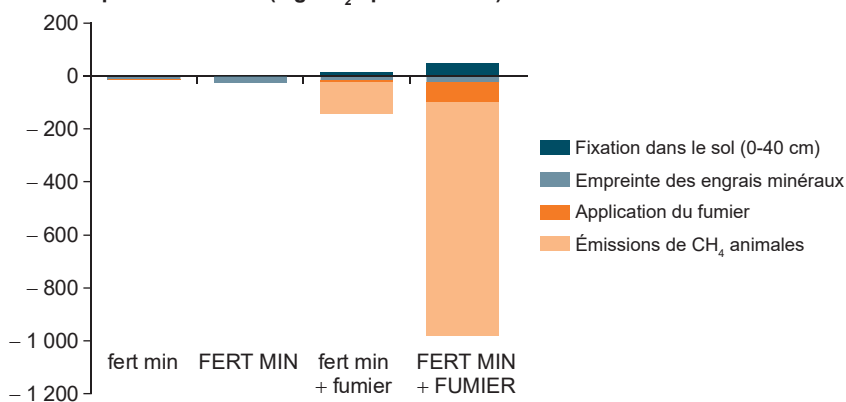
Nutriments appliqués  
sous forme minérale ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ )



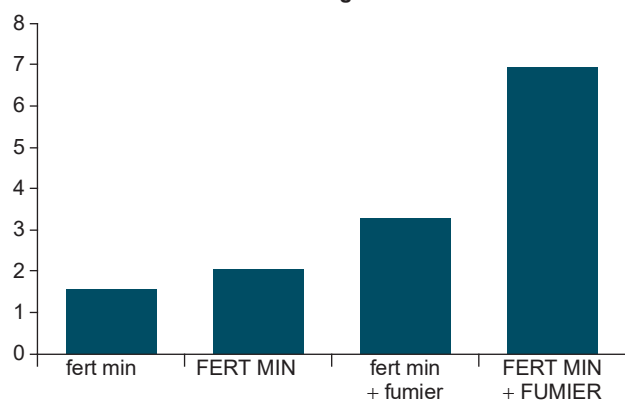
Fumier appliqué ( $\text{t MS}^* \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ )



### b. Séquestration de C ( $\text{Mg CO}_2\text{eq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 40\text{ans}^{-1}$ )



### c. Variation relative du rendement grain



**Figure 1**

Bilan environnemental de la fertilisation dans l'essai à long terme de Saria, Burkina Faso  
(par rapport à un scénario de référence dans lequel il n'y a aucun apport).

a. Caractéristiques des apports annuels.

b. Séquestration de carbone sur 40 ans par rapport au témoin sans apport.

c. Variation relative du rendement en matière sèche de grain par rapport au témoin sans apport.

\* MS : matière sèche.

Sources : HIEU (2004) ; VLEK et al. (2004) ; IPCC (2006) ; HERRERO et al. (2008) ; IPCC (2013).

Tableau 1  
Bilan agro-environnemental annuel de trois pratiques d'intensification en prenant en compte la réduction de la déforestation rendue possible par l'augmentation de rendement.

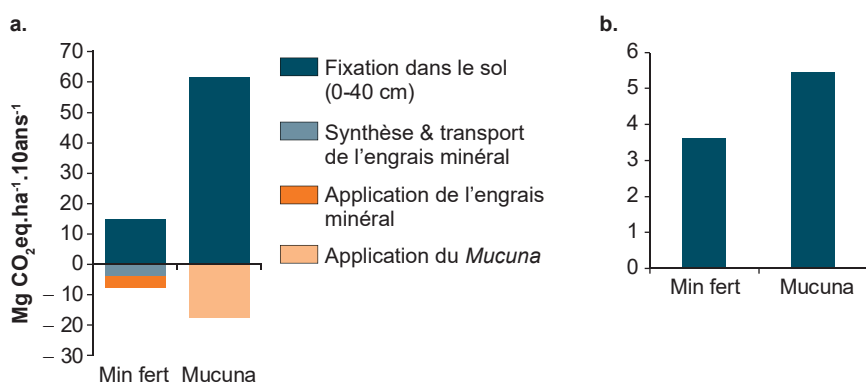
Pratiques d'intensification	Traitements	Augmentation du rendement du grain (sans unité ; référence : témoin)	Séquestration annuelle de C dans le sol (Mg C <sub>eq</sub> .an <sup>-1</sup> ) (1)	Séquestration annuelle de C dans la biomasse (Mg C <sub>eq</sub> .an <sup>-1</sup> ) (2)	Atténuation du changement climatique (déforestation évitée seule) (Mg C <sub>eq</sub> .an <sup>-1</sup> ) (3)**	Séquestration annuelle de C (déforestation évitée incluse) (Mg C <sub>eq</sub> .an <sup>-1</sup> ) (1 + 2 + 3)	Amélioration de la séquestration annuelle par la déforestation évitée (%)   3 : (1 + 2)
Fertilisation au Burkina Faso*	fert min	1,56	- 0,10	nd	0,21	0,12	225
	FERT MIN	2,07	- 0,18	nd	0,41	0,23	228
	fert min +fumier	3,29	- 0,92	nd	0,88	- 0,04	95
	FERT MIN + FUMIER	6,92	- 6,54	nd	2,28	- 4,26	35
Agriculture de conservation au Bénin	FERT MIN	3,62	0,17	nd	3,58	3,75	2063
	Mucuna pruriens	5,46	1,10	nd	6,08	7,18	554
Agroforesterie : jachère traditionnelle au Sénégal	Jachère jeune (1-9 ans)	1,42	1,42	3,97	0,00	5,39	0
	Jachère longue	0,21	0,21	1,47	0,00	1,68	0
Référence : jachère spontanée herbacée	Azadirachta indica	6,42	6,42	nd	0,00	6,42	0
	Albizia lebeck	3,06	3,06	nd	0,00	3,06	0
	Cassia siamea	2,76	2,76	nd	0,00	2,76	0
	Acacia auriculiformis	2,16	2,16	nd	0,00	2,16	0
Agroforesterie : jachère plantée au Togo	Azadirachta indica	2,04	2,04	nd	0,00	2,04	0
	Albizia lebeck	- 1,32	- 1,32	nd	0,00	- 1,32	0
	Cassia siamea	- 1,62	- 1,62	nd	0,00	- 1,62	0
	Acacia auriculiformis	- 2,22	- 2,22	nd	0,00	- 2,22	0

\* Les bilans de fertilisation organique incluent les émissions animales.  
\*\* Pour l'équivalence entre augmentation de rendement et réduction potentielle des émissions liées à la déforestation (la conversion d'une savane en culture), on fait l'hypothèse que cette dernière émet 15 Mg C par hectare défriché.  
nd : non disponible.  
Sources : figures 1, 2 et 3.

## Agriculture de conservation

Cette pratique vise à réduire les pertes en sol et nutriments par l'érosion, le lessivage et la lixiviation, et à améliorer le statut biologique du sol afin d'augmenter la productivité végétale (FAROOQ et SIDDIQUE, 2015). Dans le cas d'un couvert végétal intercalaire comme étudié en zone de savane humide au Bénin sur des cultures de maïs (BARTHÈS *et al.*, 2004) (fig. 2), le bénéfice peut être double, en y associant la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par la plante de couverture (cas du *Mucuna pruriens* var. *utilis*). Cette pratique peut être également associée à une fertilisation minérale classique. Dans cette situation, et contrairement au cas précédent, la fertilisation minérale seule engendre une séquestration nette de carbone, ce qui suggère que l'impact climatique des fertilisants est fortement dépendant des conditions agro-écologiques locales. Le semis direct sous couvert de *Mucuna* aboutit à une séquestration de carbone importante par rapport au témoin sans apport, et six fois plus importante que la fertilisation minérale seule (fig. 2a). Cette étude ne permet cependant pas de tester les effets respectifs de la fixation d'azote par la plante de couverture et celui du non-travail du sol sur les émissions de GES, et ne tient pas compte des variations d'émission de  $N_2O$ , lesquelles restent difficiles à prédire. Ces deux pratiques d'intensification augmentent toutes deux le rendement en maïs (fig. 2b), mais avec une différence moins marquée que celle observée pour la séquestration (fig. 2a et tabl. 1).

Malgré des résultats encourageants en condition expérimentales, l'adoption de l'agriculture de conservation se heurte à plusieurs difficultés : la technicité de la pratique et la sophistication de certains équipements, l'incompatibilité avec certaines pratiques traditionnelles de mutualisation des ressources (comme la vaine pâture), et des incertitudes sur le bilan carbone, tous GES confondus (POWLSON *et al.*, 2014).



**Figure 2**

Bilans agro-environnementaux sur 10 ans du semis direct sous couvert végétal de *Mucuna* et de la fertilisation minérale sur un Nitisol au Bénin.

a. Séquestration de carbone par rapport au témoin sans apport.

b. Variation relative du rendement en matière sèche de grain par rapport au témoin sans apport.

Sources : AZONTONDE *et al.* (1998) ; BARTHÈS *et al.* (2004) ; VLEK *et al.* (2004) ; IPCC (2006).

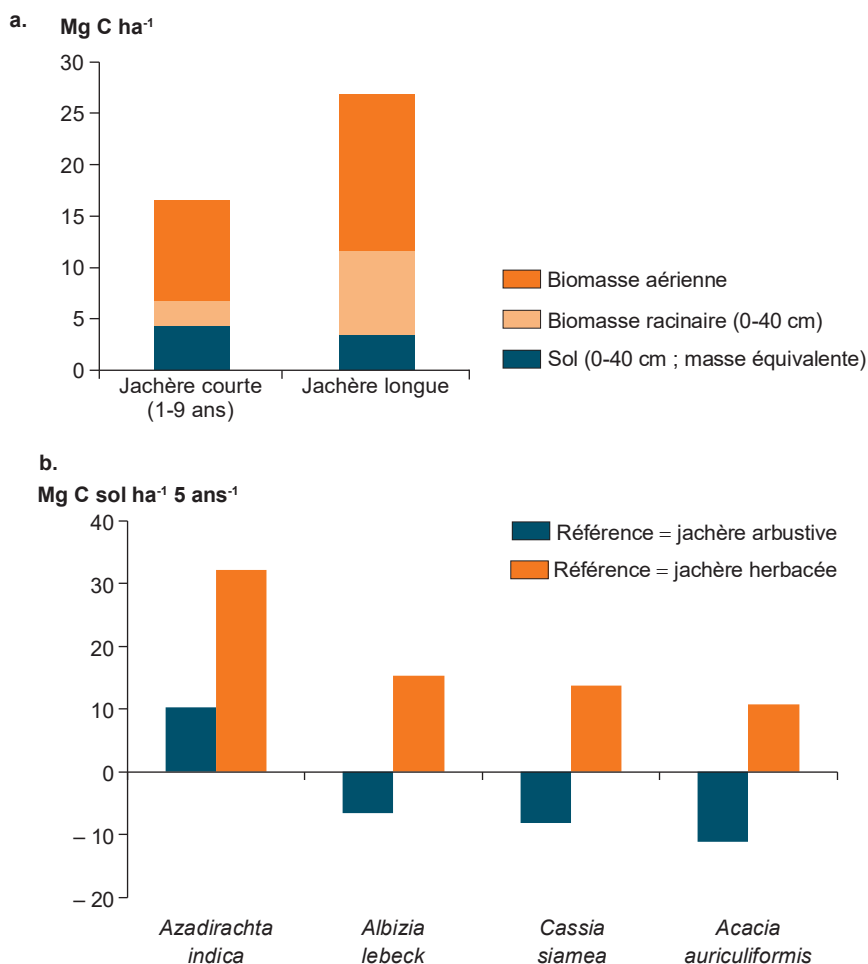
## Agroforesterie

L'agroforesterie est aussi promue en tant que pratique « climatiquement intelligente ». Elle vise à augmenter les stocks de carbone (arbres) tout en maintenant les flux (production agricole), ainsi qu'à protéger les sols et améliorer leur statut minéral. Dans la zone sahélienne sur sols profonds, le parc à *Faidherbia albida* (Del.) A.Chev., une espèce ligneuse fixatrice d'azote à phénologie inversée, est un remarquable exemple de système agroforestier simultané traditionnel qui stimule la culture annuelle associée. Cependant, déjà en pleine expansion en raison de sa multifonctionnalité (DELAUNAY *et al.*, 2009 ; SENDZIMIR *et al.*, 2011), cette forme améliorée d'usage de l'espace pourrait ne pas satisfaire le critère d'additionnalité commun à la plupart des standards de certification des projets d'atténuation du changement climatique qui permet de s'assurer que seules les émissions évitées par un effort délibéré d'atténuation sont comptabilisées et commercialisables. D'autres systèmes (séquentiels) s'appuient sur des rotations entre parcelles cultivées et jachères arbustives ou arborées. Au Sénégal, un exemple (fig. 3a) indique que c'est surtout dans la biomasse aérienne et souterraine (racines des arbres), et assez peu dans le sol, que s'accumule le carbone durant la phase de jachère. Une étude au Togo (fig. 3b) suggère que le stockage de carbone supplémentaire dans le sol (seul compartiment mesuré de l'étude), permis par la jachère améliorée (enrichie en espèces ligneuses plantées) par rapport à la jachère traditionnelle, est très variable selon l'espèce plantée et la présence ou non d'arbres dans l'écosystème de référence. Ces deux études suggèrent que l'efficacité des jachères pour stocker du carbone dans le sol est difficile à prédire, car fortement dépendante du contexte. Elles illustrent plus généralement la faible capacité de la majorité des sols ouest-africains à stocker du carbone organique, quelles que soient les pratiques culturelles.

Malgré des bilans de carbone largement positifs grâce aux apports de biomasse et bien qu'elle diversifie les productions agricoles, l'agroforesterie accroît souvent la compétition pour l'usage de l'espace à des fins alimentaires. Son extension nécessite par ailleurs des réformes foncières, afin que les paysans puissent ou souhaitent s'engager dans les activités de plantation sur le long terme (ATANGANA *et al.*, 2014). Elle suppose enfin un fort contrôle des risques d'incendie.

## Ré-imaginer le soutien à l'agriculture pour atténuer le changement climatique

Sans prise en compte d'une hypothétique déforestation évitée par l'augmentation des rendements, les études mentionnées ci-dessus sont peu encourageantes en termes d'efficacité de l'intensification agricole pour lutter contre le changement



**Figure 3**

Impact (par rapport à un scénario de référence) de la jachère sur la variation des stocks du carbone du sol.

- a. Jachère spontanée au Sénégal (scénario de référence : culture semi-permanente d'arachide).  
 b. Jachère améliorée au Togo (compartiment sol uniquement ; scénario de référence : jachère spontanée).

Sources : DRECHSEL et al. (1991) ; MANLAY et al. (2002).

climatique, avec des taux de séquestration annuels très variables pour une même pratique et parfois fortement négatifs (tabl. 1). De plus, ces limitations biophysiques s'inscrivent dans un contexte d'insécurité foncière, de désengagement des États dans le soutien de leurs agricultures, de réseaux de transport défectueux et de besoin croissant en terres.

D'autres approches favorables à l'atténuation sont cependant envisageables sur la base de pratiques économes et bénéfiques aux productions agricoles. Mieux



fermer les cycles biogéochimiques est une piste. Le bilan en azote et en phosphore dressé à l'échelle d'un village du sud du Sénégal (MANLAY *et al.*, 2004) montre que respectivement 15 et 53 % de l'azote et du phosphore exporté terminent dans les fosses septiques du village. Ces éléments pourraient être réinjectés dans le système agricole avec profit, sous condition de lever certains tabous culturels. Le gain climatique lié à une telle récupération de l'azote et du phosphore, à travers une intensification spatiale des productions et une plus forte capture de CO<sub>2</sub> atmosphérique, reste cependant faible (8-15 kg CO<sub>2</sub>eq.hab<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>). En effet, dans ce cas d'étude, l'essentiel de l'azote est exporté via la vente des produits des cultures de rente et, concernant le phosphore, la production et l'application des engrais phosphatés sont peu émissives et l'essentiel des pertes en phosphore en agriculture, plus ailleurs qu'ici, a lieu d'abord au champ (SMIL, 1999, 2000).

La gestion de l'élevage montre également des perspectives intéressantes. Les paysans convertissent fréquemment les bénéfices agricoles en troupeaux de ruminants, lesquels représentent, entre autres, une forme d'épargne traditionnelle en l'absence de système bancaire fiable. Or, ceux-ci émettent du CH<sub>4</sub> et du N<sub>2</sub>O, avec des intensités d'émission (kg CO<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup> protéine consommable) particulièrement élevées (en Afrique subsaharienne, s'élevant à 1,5 et 3,2 fois la moyenne mondiale pour la viande et le lait de bovin respectivement selon GERBER *et al.*, 2013). Garantir la sécurité de l'épargne paysanne afin d'inciter les paysans à investir davantage dans leurs systèmes de cultures (KER, 1995) serait donc une bonne stratégie d'atténuation climatique. Pour autant, (1) les pratiques traditionnelles d'élevage en Afrique subsaharienne émettent bien moins de GES par unité de surface ou par habitant que celles des systèmes intensifs du Nord (par exemple 25-50 et > 100 t CO<sub>2</sub>eq.km<sup>-1</sup> pour l'Afrique subsaharienne et les régions d'élevage tempérées respectivement selon GERBER *et al.*, 2013), (2) l'élevage remplit de multiples rôles, y compris dans la maintenance biologique des systèmes de production locaux, et (3) l'élevage augmente la résilience des systèmes de production au changement climatique, quand il ne sera pas tout simplement la seule alternative viable à l'agriculture dans les zones où l'aridité aura le plus progressé (THORNTON et HERRERO, 2015).

Actuellement, l'afforestation ou la reforestation sont les seules activités du secteur de l'usage des terres qui bénéficient d'un cadre légal et technique complet et qui soient éligibles aux marchés réglementaires. Les négociations internationales actuelles sur la réduction des émissions de GES par les autres activités du secteur comme la réduction de la déforestation et de la dégradation des forêts (REDD) ou l'agriculture, sont complexes et inachevées (UNFCCC, 2014), mais une décision prise à la 23<sup>e</sup> conférence des Parties (UNFCCC, 2017) devrait hâter l'éligibilité aux marchés carbone des émissions de GES évitées par l'intensification agricole. Dans les exemples examinés ici, ces mesures bénéficieraient plus particulièrement aux pratiques d'intensification de fertilisation organominérale ou d'agriculture de conservation, qui améliorent leur empreinte carbone (+35 à +228 % pour la fertilisation, +554 à +2 063 % pour l'agriculture de conservation) par l'augmentation des rendements et la baisse de pression induite sur les zones non cultivées (tabl. 1). En revanche, le potentiel d'atténuation de pratiques agroforestières séquentielles

ne serait guère affecté par l'élargissement des activités éligibles. La REDD par l'intensification agricole, défendue par plusieurs instances internationales, est très controversée (PIRARD et BELNA, 2012). En effet, un paysan dont les rendements croissent n'est pas forcément incité à réduire sa surface cultivée, en particulier lorsque l'intensification crée un marché qui favorise l'arrivée de nouveaux exploitants (ou l'agrandissement des exploitations). Les effets de l'intensification sur la déforestation ne sont pas toujours positifs, voire parfois franchement négatifs et souvent difficiles à quantifier. Par ailleurs, les habitants d'Afrique de l'Ouest sont très mobiles, et les pays où aurait lieu l'évitement de déforestation seraient différents de ceux où a lieu l'intensification agricole, posant la question de la répartition de la rente carbone.

Les négociations internationales n'ont, jusqu'à maintenant, que peu porté sur l'efficacité de l'utilisation des ressources ou l'attribution de quotas individuels d'émission échangeables à l'échelle planétaire. Or, en termes d'efficacité d'utilisation des ressources, un cas d'étude au sud Sénégal (tabl. 2) indique que :

- l'efficacité d'utilisation de l'espace telle que mesurée par le rendement en biomasse aérienne totale (grain et paille) dans le cas sénégalais n'est, malgré une absence d'intrants exogènes, que la moitié de celle d'un agriculteur européen moyen. Le ratio entre biomasse comestible et non comestible pour l'homme est certes bien moindre dans l'exemple sénégalais, mais les résidus non comestibles sont fortement valorisés, ceux-ci ayant de multiples usages permettant notamment au territoire villageois sénégalais une dépendance très faible aux énergies et matériaux non renouvelables ;
- la quantité d'énergie nécessaire pour produire un kilojoule de nourriture est à peu près équivalente au sud du Sénégal et aux États-Unis ;
- les émissions de GES nécessaires pour produire un kilogramme de nourriture sont moindres dans le village africain qu'aux États-Unis.

Tableau 2

*Efficacités comparées d'utilisation de différentes ressources entre un système de production traditionnel sénégalais et les agricultures du Nord.*

Critère d'efficacité	Système de production intensif comparé	Efficacité			Sources*
		Système traditionnel	Système intensif	Unité	
Espace (rendement biomasse aérienne totale)	Union Européenne	5,2	10,0	Mg MS.ha <sup>-1</sup> **	3, 4
Énergie	États-Unis	12,4	10,0	kJ d'intrant.kj <sup>-1</sup> de nourriture	1, 3
Intensité CO <sub>2</sub> produit	États-Unis	0,30	0,36	g CO <sub>2</sub> eq.kj <sup>-1</sup> de nourriture	3, 6
Intensité CO <sub>2</sub> individu	États-Unis	1,41	20,66	Mg CO <sub>2</sub> eq.hab <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>	2, 3, 5, 7, 8

\* Sources : 1 : HALL et HALL (1993) ; 2 : MANLAY (2000) ; 3 : MANLAY et al. (2004) ; 4 : FAO (2006) ; 5 : IPCC (2006) ; 6 : WEBER et MATTHEWS (2008) ; 7 : IPCC (2013) ; 8 : CAIT CLIMATE DATA EXPLORER (<http://cait.wri.org/>).

\*\* MS : matière sèche.

Ces résultats montrent qu'en plus de la faiblesse des politiques agricoles nationales et d'aménagement du territoire, c'est la faiblesse de la productivité de la main d'œuvre qui cantonne les paysans du Sud dans la pauvreté. En effet, dans le contexte actuel de mondialisation de la production, les barrières douanières ne protègent plus ces paysans contre une concurrence des agricultures industrielles des autres continents qui est déloyale d'un point de vue de la comptabilité environnementale. Dans les négociations internationales, un élargissement supplémentaire des standards réglementaires (et volontaires, mais dans une moindre mesure car actuellement plus inclusifs que les premiers) actuels est donc nécessaire pour faire pleinement participer les agricultures des savanes ouest-africaines à la lutte contre le changement climatique.

## Conclusion

Sur la base des cas examinés dans cette synthèse, il apparaît que la relation entre les bénéfices environnementaux et agronomiques est complexe. Il n'est guère possible d'établir *a priori*, en un lieu donné, si les services de fourniture (production agricole) et de régulation (atténuation du changement climatique) sont synergiques ou antagonistes. D'une part, le cycle du carbone reste mal connu à plusieurs niveaux, et d'autre part l'adoption des pratiques décrites peut engendrer, à l'échelle de l'exploitation et du territoire villageois, des problèmes sociaux (conflit pour les usages) ou se heurter à des barrières socioculturelles.

Plus généralement, l'atténuation du changement climatique en savanes ouest-africaines ne doit pas se limiter aux périmètres d'activités éligibles des standards réglementaires et volontaires, ni même à la déforestation évitée. Un paysan sénégalais émet aujourd'hui environ 14 fois moins qu'un Américain moyen (tabl. 2). En conséquence, la mise en place de quotas d'émissions individuelles échangeables, éventuellement tenant compte de responsabilités historiques (NEUMAYER, 2000), semble être aujourd'hui le levier le plus à même de favoriser le rééquilibrage des moyens entre l'agriculture du Sud et celle du Nord. Bien qu'ils ne soient pas à l'agenda des négociations internationales, ces quotas pourraient, selon les modalités de gestion de la rente carbone, créer deux leviers pour à la fois (1) sortir les agriculteurs ouest-africains de la pauvreté (attribution d'une subvention librement utilisable), et (2) accompagner la mutation de l'agriculture familiale vers des systèmes toujours écologiquement intensifs mais au travail plus productif, sans passage (concept de « saut technologique » inspiré de GOLDEMBERG, 1998) par le modèle de l'agriculture industrielle fortement dépendant de la maintenance de substitution (*sensu* IZAC et SWIFT, 1994). Ces crédits, dans le cadre d'un soutien par l'État de ces sauts technologiques, pourraient être une incitation à freiner les émissions de carburant fossile liées à la motorisation et à la fertilisation chimique (en particulier azotée, très émettrice

de GES et substituable par la fixation biologique). Pour cette mutation, plusieurs pratiques agro-écologiques traditionnelles existant aujourd'hui peuvent encore être améliorées. D'autres restent à inventer (MANLAY *et al.*, chapitre 9 de cet ouvrage ; FRASER *et al.*, 2014) sur la base d'une meilleure compréhension de l'écologie actuelle et future des savanes, et du contexte socio-économique et culturel de la paysannerie d'Afrique de l'Ouest.

## Bibliographie

**ANDRIEU N., VAYSSIERES J., CORBEELS M., BLANCHARD M., VALL E., TITTONEL P., 2015**  
From farm scale synergies to village scale trade-offs: cereal crop residues use in an agro-pastoral system of the Sudanian zone of Burkina Faso. *Agricultural Systems*, 134 : 84-96.

**ATANGANA A., KHASA D., CHANG S., DEGRANDE A., 2014**  
« Socio-cultural aspects of agroforestry and adoption. » *In : Tropical agroforestry*, Springer Netherlands : 323-332.

**AUBERT P.-M., BRUN M., TREYER S., 2015**  
*Ensuring transparency and accountability of the Global Alliance for Climate Smart Agriculture in the perspective of COP21. Policy Brief 3/15 Agriculture*. Paris, Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI), 4 p.

**AZONTONDE A., FELLER C., GANRY F., REMY J.-C., 1998**  
Le mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au sud du Bénin. *Agriculture et Développement*, 18 : 55-62.

**BARTHÈS B., AZONTONDE A., BLANCHART E., GIRARDIN C., VILLENAVE C., LESAINT S., OLIVER R., FELLER C., 2004**  
Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. *Soil Use and Management*, 20 Suppl. S : 231-239.

**BERNOUX M., FELLER C., CERRI C. C., ESCHENBRENNER V., CERRI C. E. P., 2006**  
« Soil carbon sequestration ». *In* Roose E., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. (éd.) : *Erosion & Carbon Dynamics*, Boca Raton, USA, CRC Publisher.

**CARON P., TREYER S., 2015**  
« L'agriculture climato-intelligente et les arènes de la négociation internationale sur le changement climatique ». *In* Torquebiau E. (éd.) : *Changement climatique et agricultures du monde*, Versailles, France, Éditions QUAE : 303-313.

**DELAUNAY V., DESCHAMPS-COTTIN M., BERTHAUDIÈRE V., VILA B., OLIVEAU S., SANTOS S. D., SOUMARE A., LALOU R., 2009**  
*Dynamique démographique et dynamique du parc agroforestier à Faidherbia albida (Del.) A. Chev. en pays Serer (Sob, Sénégal)*. Présenté au XXVI<sup>th</sup> International Population Conference, Marrakech, Maroc.

**DRECHSEL P., GLASER B., ZECH W., 1991**  
Effect of four multipurpose tree species on soil amelioration during tree fallow in Central Togo. *Agroforestry Systems*, 16 : 193-202.

**FAO, 2006**  
*FAOStat – Agriculture database*. Food and Agricultural Organization, Rome.

**FAO, 2010**  
*Climate-smart agriculture – Policies, Practices and financing for food security, adaptation and mitigation*. Food and Agricultural Organization, Rome, 41 p.

**FAROOQ M., SIDDIQUE K. H. M., 2015**  
*Conservation Agriculture*. Cham: Springer International Publishing, 665 p.

**FENHANN J., SCHLETZ M., 2015**  
*CDM/JI Pipeline analysis and database*. UNEP & Danish Technical University. Copenhagen, Danemark.

- FRASER J. A., LEACH M., FAIRHEAD J., 2014**  
Anthropogenic dark earths in the landscapes of Upper Guinea, West Africa: intentional or inevitable? *Annals of the Association of American Geographers*, 104 (6) : 1222-1238.
- GERBER P. J., STEINFELD H., HENDERSON B., MOTTET A., OPIO C., DIJKMAN J., FALCUCCI A., TEMPIO G., 2013**  
*Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 115 p.
- GOLDEMBERG J., 1998**  
Leapfrog energy technologies. *Energy Policy*, 26 (10) : 729-741.
- HALL C. A. S., HALL M. H. P., 1993**  
The efficiency of land and energy use in tropical economies and agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 46 : 1-30.
- HERRERO M., THORNTON P. K., KRUSKA R., REID R. S., 2008**  
Systems dynamics and the spatial distribution of methane emissions from African domestic ruminants to 2030. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 126 (1-2) : 122-137.
- HIEN E., 2004**  
*Dynamique du carbone dans un acrisol ferrique du Centre Ouest Burkina : influence des pratiques culturelles sur le stock et la qualité de la matière organique*. Thèse de doctorat, Science du sol, École nationale supérieure agronomique, Montpellier, France.
- IPCC, 2006**  
*IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Hayama, Japan, Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC, 2013**  
*Climate change 2013 – The physical science basis – Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA, Cambridge University Press, 1535 p.
- IZAC A. M. N., SWIFT M. J., 1994**  
On agricultural sustainability and its measurement in small-scale farming in sub-Saharan Africa. *Ecological Economics*, 11 (2) : 105-125.
- KER A., 1995**  
*Farming systems in the African savanna. A continent in crisis*. Ottawa, International Development Research Centre (IDRC), 176 p.
- LIPPER L., THORNTON P., CAMPBELL B. M., BAEDEKER T., BRAIMOH A., BWALYA M., CARON P., CATTANEO A., GARRITY D., HENRY K., HOTTLER R., JACKSON L., JARVIS A., KOSSAM F., MANN W., MCCARTHY N., MEYBECK A., NEUFELDT H., REMINGTON T., PHAM THI S., SESSA R., SHULA R., TIBU A., TORQUEBIAU E.F., 2014**  
Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4 (12) : 1068-1072.
- MANLAY R. J., 2000**  
*Organic matter dynamics in mixed-farming systems of the West African savanna: a village case study from south Senegal*. Thèse de doctorat, ENGREF, France.
- MANLAY R. J., MASSE D., CHOTTE J.-L., FELLER C., KAÏRÉ M., FARDOUX J., PONTANIER R., 2002**  
Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 88 (3) : 233-248.
- MANLAY R. J., ICKOWICZ A., MASSE D., FELLER C., RICHARD D., 2004**  
Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna – II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79 (1) : 83-107.
- MAYAUX P., BARTHOLOME E., FRITZ S., BELWARD A., 2004**  
A new land-cover map of Africa for the year 2000. *Journal of Biogeography*, 31 (6) : 861-877.
- NEUMAYER E., 2000**  
In defence of historical accountability for greenhouse gas emissions. *Ecological Economics*, 33 : 185-192.
- PIERI C., 1992**  
*Fertility of soils: a future for farming in the West African savannah*. Berlin, Springer-Verlag, 348 p.
- PIRARD R., BELNA K., 2012**  
Agriculture and deforestation: is REDD+ rooted in evidence? *Forest Policy and Economics*, 21 : 62-70.

**POWLSON D. S., STIRLING C. M., JAT M. L., GERARD B. G., PALM C. A., SANCHEZ P. A., CASSMAN K. G., 2014**

Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4 (8) : 678-683.

**SENDZIMIR J., REIJ C. P., MAGNUSZEWSKI P., 2011**

Rebuilding resilience in the Sahel: regreening in the Maradi and Zinder regions of Niger. *Ecology and Society*, 16 (3) : 1.

**SMIL V., 1999**

Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles*, 13 (2) : 647-662.

**SMIL V., 2000**

Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25 : 53-88.

**SULTAN B., GUAN K., KOURESSY M., BIASUTTI M., PIANI C., HAMMER G. L., MCLEAN G., LOBELL D. B., 2014**

Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. *Environmental Research Letters*, 9 (10) : 104006.

**THORNTON P.K. HERRERO M., 2015**

Adapting to climate change in the mixed crop

and livestock farming systems in sub-Saharan Africa. *Nature Climate Change*, 5 (9) : 830-836.

**UNFCCC, 2014**

*Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its nineteenth session. FCCC/CP/2013/10/Add.1.* Bonn, United Nations Framework Convention on Climate Change. 14 p.

**UNFCCC, 2017**

*Report of the Conference of the Parties on its twenty third session, held in Bonn from 6 to 8 November 2017. Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-third session. FCCC/CP/2017/11/Add.1.* Bonn, United Nations Framework Convention on Climate Change. 35 p.

**VLEK P.L. G., RODRIGUEZ-KUHL G., SOMMER R., 2004**

Energy use and CO<sub>2</sub> production in tropical agriculture and means and strategies for reduction or mitigation. *Environment, Development and Sustainability*, 6 : 213-233.

**WEBER C. L., MATTHEWS H. S., 2008**

Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environmental Science & Technology*, 42 (10) : 3508-3513.